

Р. В. Левченко, В. В. Драгобецкий, д-р техн. наук,
П. Г. Пузырь, канд. техн. наук, Кременчуг, Украина

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ТЕОРИИ ОБОЛОЧЕК ПРИ ПРОФИЛИРОВАНИИ ЗАГОТОВОК ДЛЯ ОБОДЬЕВ КОЛЕС

Показано, что методы виробництва якісних ободів коліс різних транспортних засобів засновані на процесах холодного штампування і радіально-ротаційному профілюванню. Для отримання реальної картини розподілу напруг і деформацій за профілем одержуваного виробу потрібно розглядати заготовку як оболонку обертаючої і залучати добре розроблений математичний апарат теорії оболонок і пластин. Це дасть можливість враховувати більшу кількість факторів, що впливають на якість одержуваного виробу. Шляхом теоретичного аналізу встановлювати вплив внутрішніх моментів, що діють в меридіональному і тангенціальному напрямках, на напружено-деформований стан оболонки в процесі формозміни.

Показано, что методы производства качественных ободьев колес различных транспортных средств основаны на процессах холодной штамповки и радиально-ротационном профилировании. Для получения реальной картины распределения напряжений и деформаций по профилю получаемого изделия требуется рассматривать заготовку как оболочку вращения и привлекать хорошо разработанный математический аппарат теории оболочек и пластин. Это даст возможность учитывать большее количество факторов, влияющих на качество получаемого изделия. Путем теоретического анализа устанавливать влияние внутренних моментов, действующих в меридиональном и тангенциальном направлениях, на напряженно-деформированное состояние оболочки в процессе формоизменения.

It is shown that the methods of production-quality wheel rims of different vehicles based on the processes of cold pressing and rotating radial profiling. To get the real picture of the distribution of stresses and deformations in the profile obtained product is required to consider procurement as a shell of revolution and bring well-developed mathematical apparatus of the theory of shells and plates. This will provide an opportunity to consider more factors that affect the quality of the product. Through theoretical analysis to establish the influence of internal moments acting in the meridional and tangential directions, the stress-strain of states in the process of forming a shell.

Теоретические основы для определения напряженно-деформированного состояния в процессе профилирования цилиндрических обечаек при получении ободьев колес транспортных средств были заложены в работах [1,2]. Они основывались на решении уравнений равновесия в цилиндрических координатах для выделенного участка заготовки с использованием условия пластичности Треска-Сен-Венана. Так как радиально-ротационное профилирование представляет собой процесс локального деформирования, где заготовка получает требуемую форму между парой вращающихся роликов, имеющих определенный профиль, то, как показано в работах [3,4], пластический очаг деформации окружен упруго деформированными зонами, которые оказывают значительное влияние на распределение пластических деформаций по профилю заготовки. Так же при деформировании цилиндрических обечаек имеет

194

место действие моментов в тангенциальных и меридиональных направлениях, что не учитывалось в теоретических исследованиях проводившихся ранее.

Качественный результат по определению напряженно-деформированного состояния заготовки в процессе профилирования можно получить на основе достаточно хорошо разработанных моментной и безмоментной теорий деформирования оболочек вращения, где приводятся решения различного рода задач в упругой области [5]. Но для перехода в пластическую область данные теории выводят уравнения равновесия, которые не представляется возможным решить аналитическими методами и предлагаются только численные решения, что не дает в полной мере раскрыть сущность физических явлений, происходящих в очаге деформации при локальном формоизменении оболочек.

Целью данной работы является попытка упрощения аналитических расчетов при деформировании с переходом из упругой зоны в пластическую на примере определения изгибающих моментов при деформировании полосы.

Уравнение равновесия участка цилиндрической заготовки в упругопластической области при приведении внутренних моментов и усилий к перемещениям имеет вид [5]:

$$\text{где } D' = \left[\frac{ER^3}{12(1-\mu^2)} \right] - \text{цилиндрическая жесткость обечайки};$$

μ – коэффициент Пуассона (при пластической деформации $\mu = 0,5$, [4]);

$\varphi_c = \frac{E_c}{E}$, $\varphi_k = \frac{E_k}{E}$ – безразмерные величины;

E – модуль упругости для данного материала;

E_k – касательный модуль упругости;

$E_k = \frac{d\sigma}{d\varepsilon}$ – по диаграмме растяжения;

u – радиальное перемещение участка заготовки;

h – толщина заготовки;

Как известно [3], в процессах вытяжки, отбортовки, раздачи, формовки и т.д. упругими деформациями, ввиду больших пластических, можно пренебречь. К таким процессам можно отнести и радиально-ротационное профилирование.

В случае чистого изгиба, когда сечение заготовки обладает двумя осями симметрии (оси X и Y – оси симметрии поперечного сечения), и изгиб будет происходить в одной этих плоскостей, удовлетворяя условиям совместности деформаций, будем иметь выражения деформаций для всего сечения:

$$\begin{aligned} e_{zz} &= e_t = \chi y', \\ e_{xx} &= e_{yy} = \frac{l}{2} e_{zz}, \\ e_{xy} &= e_{xz} = e_{yz} = 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где χ – кривизна центральной оси полосы в результате изгиба.

Принимаем, что материал бруса изотропный и не упрочняющийся. Нагружение полосы будем считать простым. Тогда направляющие тензоры напряжений и деформаций в упругопластической области совпадают и в проекциях на оси X, Y, Z будут выражаться формулами [6]:

$$\begin{aligned} \sigma_x - \sigma &= \frac{2\sigma_i}{3e_i}(e_x - e), \quad \sigma_{xy} = \frac{\sigma_i}{3e_i}e_{xy}, \\ \sigma_y - \sigma &= \frac{2\sigma_i}{3e_i}(e_y - e), \quad \sigma_{yz} = \frac{\sigma_i}{3e_i}e_{yz}, \\ \sigma_z - \sigma &= \frac{2\sigma_i}{3e_i}(e_z - e), \quad \sigma_{zx} = \frac{\sigma_i}{3e_i}e_{zx}, \end{aligned} \quad (2)$$

где σ – среднее напряжение;

e – средняя деформация;

σ_i – интенсивность напряжений;

e_i – интенсивность деформаций.

Интенсивность напряжений для каждого материала является вполне определенной и независимой от характера напряженного состояния функцией интенсивности деформаций

$$\sigma_i = \Phi(e_i),$$

или, выделяя упругую часть

$$\sigma_i = 3Ge_i(1 - \omega(e_i)), \quad (3)$$

где G – модуль сдвига;

$\omega(e_i)$ – функция деформаций, зависящая от рода материала.

Относительно задачи изгиба полосы на основании (1) имеем $e_i = |e_t|$ и поэтому из (2) находим:

$$\sigma_z = \sigma_t; \quad \sigma_x = \sigma_y = \sigma_{xy} = \sigma_{yz} = \sigma_{zx} = 0; \quad \sigma_i = |\sigma_t|.$$

Из (3) получаем зависимость для σ_t и e_t :

$$\sigma_t = Ee_t(1 - \omega(e_t)). \quad (4)$$

Вследствие симметрии сечения продольная сила $\int_{-h/2}^{h/2} \sigma_t dy = 0$ в полосе

отсутствует. Значит, задача решается одним только соотношением между изгибающим моментом и кривизной, которое получается, если написать вы-

ражение момента внутренних напряжений и приравнять его изгибающему моменту [6]:

$$M = 2 \int_0^{b/2} \sigma_I b y dy, \quad (5)$$

где b – ширина сечения;
 h – высота сечения.

Это уравнение на основании (3) с учетом упругопластических деформаций запишется в виде:

$$M = EI \chi - \int_0^{b/2} \omega e_I b y dy, \quad (6)$$

где I – момент инерции сечения.

Упругие деформации необходимо учитывать при получении деталей операциями гибки, в других процессах обработки металлов давлением эти деформации очень малы по сравнению с пластическими деформациями и поэтому при расчетах формоизменения в пластической области ими пренебрегают. В связи с этим упростим выражение для изгибающего момента, взяв только пластические деформации, из (3) получим:

$$\sigma_I = E e_I \omega(e_I), \quad (7)$$

тогда

$$M = \int_0^{b/2} E e_I \omega(e_I) b y dy. \quad (8)$$

В точке перехода от упругих напряжений к пластическим, они равны между собой и равны напряжению текучести (материал не упрочняющийся)

$\sigma_{упр} = \sigma_s = \sigma_I$. Отсюда $e_I = \frac{\sigma_s}{E}$. Подставляя полученное выражение в (8) и,

учитывая, что $\omega = I$ для идеально пластичного материала получим:

$$\begin{aligned} M &= \int_0^{b/2} \sigma_s b y dy = \sigma_s b \frac{y^2}{2} \Big|_0^{b/2} = \sigma_s b \frac{h^2}{8}. \\ M &= \int_{-b/2}^0 \sigma_s b y dy = \sigma_s b \frac{y^2}{2} \Big|_{-b/2}^0 = -\sigma_s b \frac{h^2}{8}. \\ M_{\Sigma} &= \left| \sigma_s b \frac{h^2}{8} \right| + \left| -\sigma_s b \frac{h^2}{8} \right| = \sigma_s b \frac{h^2}{4}. \end{aligned} \quad (9)$$

где σ_s – предел текучести материала.

Получили выражение для пластического изгибающего момента. Похожее выражение было получено в работах многих исследователей, так напри-

мер, в работе [3] при условии, что изгиб осуществляется по сравнительно большому радиусу, когда нейтральная поверхность совпадает с срединной

поверхностью заготовки ($\rho_n = r + \frac{s}{2} = R - \frac{s}{2}$), деформирование происходит

без упрочнения, толщина упругодеформированного слоя мала, то выражение для изгибающего момента для единичной ширины заготовки имело вид:

$$\begin{aligned} M &= \int_{\rho_n}^R \sigma_s \rho d\rho + \int_r^{\rho_n} -\sigma_s \rho d\rho = \sigma_s \frac{R^2 - \rho_n^2 - \rho_n^2 + r^2}{2} = \\ &= \sigma_s \frac{(R - \rho_n)(R + \rho_n) - (\rho_n - r)(\rho_n + r)}{2} = \sigma_s \frac{R + \rho_n - \rho_n - r}{4} = \sigma_s \frac{s^2}{4}, \end{aligned}$$

где R – радиус кривизны наружной поверхности;

r – радиус кривизны внутренней поверхности;

ρ_n – радиус кривизны нейтрального слоя.

Вывод. На примере теоретического анализа процесса упругопластического изгиба удалось упростить выражение для определения изгибающего момента в пластической области. Разработанный подход можно применить к теоретическому анализу процесса профилирования, который схематически представляет собой локальное деформирование оболочек вращения. Опираясь на хорошо разработанный математический аппарат теории оболочек и пластин и, применяя его к анализу напряженно-деформированного состояния при профилировании ободьев колес, можно добиться учета большего количества факторов, влияющих на распределение деформаций по толщине оболочки, тем самым значительно повысить точность исследования и наметить пути усовершенствования процесса.

Список использованных источников: 1. Потекушин Н.В. Исследование процесса радиального профилирования // Н.В. Потекушин // Автомобильная промышленность. – 1976. - №4. – С. 31-35. 2. Потекушин Н.В. Экспериментальное исследование процесса формообразования профилированных ободьев / Н.В. Потекушин // Автомобильная промышленность. – 1977. – № 1. – С. 33–36. 3. Попов Е.А. Основы теории листовой штамповки / Попов Е.А. – М.: Машиностроение, 1977. – 278 с. 4. Тимошенко С.П. Пластинки и оболочки [Текст] / С.П. Тимошенко, С. Войновский-Кригер. – М.: Наука, 1966. – 635 с. 5. Матвийчук В.А. Совершенствование процессов локальной ротационной обработки давлением на основе анализа деформируемости металлов: монография / В.А. Матвийчук, И.С. Алиев. – Краматорск: ДГ МА, 2009. – 268 с. 6. Ильишин А.А. Пластичность. Упругопластические деформации. Ч 1 / А.А. Ильишин. – М.: ОГИЗ, 1948. – 377 с.

Поступила в редколлегию 11.05.2012